

2. 加速器第六研究系（光源）

2-1. 概要

加速器研究施設・加速器第六研究系は、放射光源加速器（PF リング、PF-AR）の運転・維持管理ならびに光源性能向上に関係する研究開発をおこなっている。あわせて放射光の次期計画へ向けた光源加速器開発やビームダイナミックスの研究を行うとともに、応用超伝導加速器イノベーションセンター（iCASA）との協力でエネルギー回収型リニアック（Energy Recovery Linac, ERL）に関連する開発研究および運転・維持を行っている。メンバーを表1に示すとともに、各グループの活動内容を以下に記載する。

光源第1グループは、主にPFリング、PF-ARおよびcERLにおける軌道解析・ビーム力学の研究、電磁石および電磁石電源システムの維持・管理および開発を担当している。PFリングのビーム輸送路については、LinacおよびKEKB-BTグループの協力を得て業務を行っている。また、将来光源計画ではラティス設計やビーム力学及び電磁石設計などを精力的に進めており、EUV-FEL光源計画でもiCASAと共同で全体のラティス設計とバンチ圧縮を含むビーム輸送のシミュレーション研究を行っている。2024年4月1日付けで長橋進也氏が技術副主幹に昇任した。2025年1月1日付けで下崎義人氏が教授に昇任した。

光源第2グループは、主に高周波加速（RF）システムを担当するとともに、光源加速器におけるビーム力学の研究を行っている。また、新放射光源計画のRFシステムの検討も行っている。PFリングのRFシステムの業務は光源第2グループが単独で担当し、PF-ARのRFシステムの業務は光源第2グループとKEKB RFグループが共同で行っている。2024年度より、坂中教授の定年にともなって山本尚人准教授がグループリーダーを務める。

光源第3グループはPFリング、PF-ARおよびcERLの真空系を担当し、またPFリングの超伝導ウィグラーの保守維持・運転を担っている。2024年度はPFリング入射部を構成するセプトラム真空ダクトの設計検討のほか、新光源実現に向け特に放射光照射下で有効な排気作用を持ち、さらにガス放出も低減するビームダクト内面コーティング技術の開発研究を推進している。2024年4月1日付けで内山隆司氏が前任技師に昇任した。2024年10月1日付けで田中窓香氏が准技師として加速器第五研究系から六系に異動となり、第3グループの一員として活躍している。

光源第4グループは、PFリング、PF-ARおよびcERLのビーム診断・ビーム制御システムに加え、それぞれの加速器制御システムを担当している。様々なビームパラメータの診断を可能にする多種多様なビームモニターや、蓄積ビームの軌道変動および不安定現象を抑制するための高速フィードバックシステムの運用・維持管理を行っている。また、現状より高度なビーム診断・ビーム制御を必要とする次期光源の実現に向けて、これらのシステムの高度化や研究開発も行っている。加速器制御については、各種シミュレーションの基盤となるPF計算機システムを管理・運用するとともに、加速器コンポーネントの遠隔制御に不可欠な高速ネットワークや各種サーバの維持管理、制御ソフトウェアの開発を行っている。2024年4月1日付けで塩澤真未氏が准技師に昇任した。

加速器第六研究系		
帯名	崇	教授・研究主幹
光源第1グループ		
原田	健太郎	教授・グループリーダー
下崎	義人	教授
田中	オリガ	助教
東	直	助教
中村	典雄	研究員
長橋	進也	前任技師・技術副主幹
光源第2グループ		
山本	尚人	准教授・グループリーダー
内藤	大地	助教
坂中	章悟	特別教授
本村	新	技術員
高橋	毅	シニアフェロー
光源第3グループ		
本田	融	教授・グループリーダー
谷本	育律	教授
佐々木	洋征	助教
金	秀光	助教
Bian	Baoyuan	博士研究員
内山	隆司	前任技師
野上	隆史	専門技師
田中	窓香	准技師
光源第4グループ		
高井	良太	准教授・グループリーダー
下ヶ橋	秀典	専門技師
塩澤	真未	准技師
多田野	幹人	シニアフェロー
光源第5グループ		
宮内	洋司	教授・グループリーダー
芳賀	開一	非常勤研究員
濁川	和幸	前任技師・技術調整役
田原	俊央	専門技師
光源第6グループ		
満田	史織	教授・グループリーダー
高木	宏之	准教授
篠原	智史	助教
小林	幸則	特別教授
上田	明	専門技師
光源第7グループ		
土屋	公央	教授・グループリーダー
阿達	正浩	研究機関講師
齊藤	寛峻	特別助教
江口	柊	准技師
塩屋	達郎	非常勤研究支援員

ユレーションの基盤となるPF計算機システムを管理・運用するとともに、加速器コンポーネントの遠隔制御に不可欠な高速ネットワークや各種サーバの維持管理、制御ソフトウェアの開発を行っている。2024年4月1日付けで塩澤真未氏が准技師に昇任した。

光源第5グループは、放射光による大パワーの熱負荷から全ての機器を保護し、安全に制御された放射光をビームラインに供給するため、基幹チャンネルシステムに関する研究開発と、安定運用を実現するための維持・改良を行なっている。さらに、光源加速器の放射線安全系に関する維持・改良および次期放射光源のための安全系システムの開

発を行っている。

光源第6グループは、主に電磁石電源と入射用パルス電源および入射システム全般を担当する。PFリングおよびPF-ARでは電源の老朽化が進んでおり、適切なメンテナンス・更新計画を策定することが必須である。更新にあたっては昨今の電力事情に配慮した高効率化および次期光源にむけた拡張性・自由度の高い設計であることも望まれる。パルス電源の管理では既存システムのメンテナンスの他、従来のサイクロンに変わる半導体化や次世代入射システムにむけたキッカー研究開発を行う。PF-ARリングにおける運転調整・高度化や測定器開発テストビームラインの管理・調整、ビーム輸送路の5 GeV エネルギートップア

ップ運転対応などを含む運転管理を担う。満田グループリーダーを含め、2022年度までは第1グループであったところを再編している。2024年10月1日付で満田史織氏が教授に昇任した。

光源第7グループは、PFリングおよびPF-ARに設置された挿入光源の維持管理、新たな挿入光源の設計・開発、リングへの設置から運転モードの確立までを担っている。将来光源計画の蓄積リングパラメータに基づいて、長直線部、短直線部に設置するアンジュレータの性能評価を行っている。また、ERLベースのEUV-FEL光源計画の長尺アンジュレータの設計とFEL性能の評価を行っている。

2-2. 活動内容

概要

冒頭に述べたように、加速器六系の重要なミッションの1つは放射光ユーザーに対して安定かつ高性能な放射光を供給することである。PF リング、PF-AR とともに稼働から約 45 年を経過しており、各種装置の老朽化が顕著になってきているが、随時対策を講じながら、故障率 1% 台の安定な運転を維持してきた。2024 年度は入射リニアック及び蓄積リング側も大きな改造工事は無く、当初目標であるユーザー運転時間として PF3600 時間、PF-AR2400 時間を確保できた。さらに、PF リングでは、小型電源の更新と BPM 更新による軌道安定化システムの高度化を達成してユーザー運転に供している。PF-AR では、南実験棟において測定器開発テストビームラインがユーザー運転に入っており、既に多くの実験課題が実施されている。以下ではそれぞれについて主要トピックスを記載するとともに、次期光源として検討をすすめている超伝導加速空洞と蓄積リングを組み合わせた PF ハイブリッド光源 (PF-HLS) およびそれを発展させた量子マルチビーム施設計画について紹介する。

(1) PF リングの運転・維持・管理および開発

PF リングの運転統計

表 1 に直近 3 年間 2022 年度から 2024 年度までの PF リングの運転統計を示し、図 1 に過去 15 年間の運転統計を示す。ユーザー運転時間の目標として PF 3,600 時間、PF-AR 2,400 時間を掲げているところ 2024 年度は目標を達成できている。グラフでは 2023 年度に運転時間が減少していることが顕著であるが、これは前年度から延期していた線形加速器の加速管更新作業時間を確保するために夏期停止期間が例年より長くなったことが理由であり、トラブル等によるものではない。

故障時間は前年度より少し多い約 27.5 時間となったが、故障率は約 0.7%、平均故障間隔 (MTBF) は約 192.4 時間で、運転時間が長くなったことに対応して少し悪化しているものの、十分に良好な値を維持できている。故障の内訳をみると、2024 年度は電磁石関係が約 34.3%、RF 関係

表 1 直近 3 年間の PF リングの運転統計

Fiscal Year	2022	2023	2024
Total Operation Time [h]	4128	3648	4440
Scheduled user time [h]	3616	3096	3848
Number of failures	25	18	20
Total down time [h]	25.8	15.2	27.5
Failure rate	0.7	0.5	0.7
MTBF [h]	144.6	172.0	192.4
Mean down time [h]	1.0	0.8	1.4

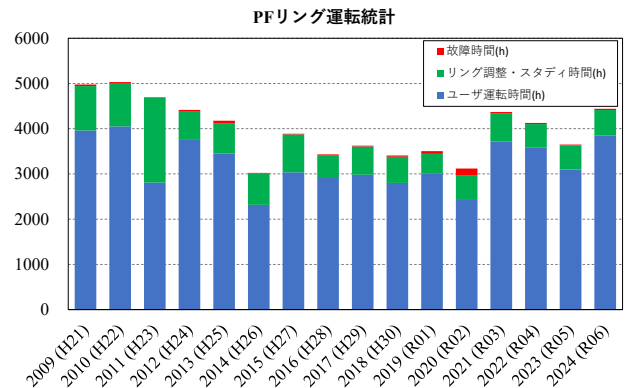


図 1 直近 16 年間の PF リング運転時間

が 27.6% となりこの 2 つが大部分を占めている。近年では RF システムのトラブル割合は少なかったのに対して、2024 年度はクライストロンの不調が頻発したことにより通常の 4 台運転から 3 台運転に減らしてのユーザー運転時間が多かった。この状況に対応して、機構より RF クライストロン 1 台を調達する予算措置を受けて現在製作を行っている。PF でのクライストロン新規製作は約 12 年ぶりとなった。今後も各グループとも老朽化対策を推進していく。このとき、単なる故障品の交換ではなく、性能・機能向上をともなった更新を心がけていく。

PF リング中型電源更新

PF リングのビーム軌道の安定性向上のため、四極電磁石および六極電磁石に使用する中型電源の一部を更新した。従来の電源は出力電流の安定度が 100 ppm 未満であったが、新電源では 10 ppm 未満を目標とし、実際に 3 ~ 4 ppm の安定度を達成した。これにより、高精度な電流制御を備えた電磁石用電源の開発技術を確立した。新電源は、電源ユニットモジュールの組み合わせによって構成されている。電源の定格出力は、使用する電源モジュールの数によって変更可能である。ベースユニットモジュールの定格は 125 A / 140-160 V または 500 A / 45-50 V であり、これらを用いることで、A 型電源は 650 A / 140 V、B 型電源は 750 A / 45 V の定格出力を実現できる。あわせて省エネ化と省スペースのための小型化も達成している。図 2 にインストール前後での写真を示す。

図 3 に、A 型電源の 10 時間にわたる長期安定度を示す。電源ユニットモジュールの組み合わせにより、必要に応じた多様なタイプの電源を容易に設計・製作できる柔軟性と拡張性が得られる。また、故障したモジュールを正常なものに交換することで、短時間での修理が可能な設計となっており、保守性の向上も果たしている。



図2 四極および六極電磁石に使われる中型電源。更新前の旧電源 (a) ならびに更新後の新電源 (b) の写真。

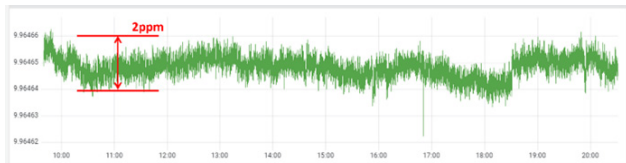


図3 PF リングの電磁石に接続した状態で測定した A 型電源の安定度。縦軸は電流モニター値、横軸は時間で約 10 時間の変化を示している。

インターロック更新

2024 年夏期の停止期間中にインターロックシステムの更新を行った。ハードウェア類は既に導入していたが、春期は Linac が連続運転をしていたためこの機会の実施となったものである。古い PLC を更新し、従来は直接配線していた各種の機器を産業用バス経由とすることで省配線化も達成できているほか、各種の表示器も更新している。今後は、ビームライン側とつないでいる経路も PLC ベースの機器に置き換えていく計画である。

LLRF 更新とマシンスタディ

2023 年度に低電力 RF 系を旧来のアナログシステムからデジタル処理系に全面更新し、その安定運用に向けたビーム調整などを実施してきた。その後も特に深刻なトラブルは無く安定して運用できている。あわせて、旧システムでは実現が困難であった調整も可能となり（4 台の RF に個別に FM 変調をかけるなど）運転に役立っているほか、過渡的変動補償の原理実証などあらたなマシンスタディを実施している。これは 1.5 GHz 高調波空洞の導入もあわせて次期光源開発にも直結するものである。

BPM と軌道フィードバックシステム更新

2024 年度第 3 期ユーザー運転より、新しいビーム位置測定システムならびに高速軌道フィードバックシステムが全面的に導入された。新システムは MicroTCA.4 規格のデジタル信号処理回路をベースに構築されている。蓄積ビームの COD は BPM と同数の回路により 10 kHz のレートで測定され、逆応答行列を用いた演算結果を高速補正電磁石の電流値へフィードバックすることにより所定の基準軌道に補正される（図 4）。これまで 30 年近く運用されてきた

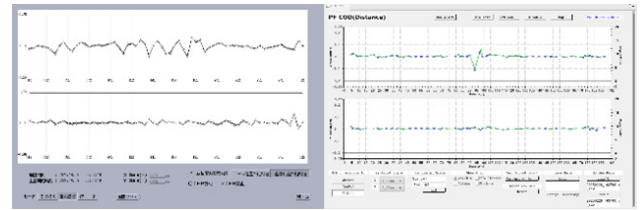


図4 旧 BPM システムでのビーム位置表示例（左）と、新システムでの表示例（右）。いずれも基準軌道からの差分を表示している。

VME ベースの旧システムからの移行は、第 3 期運転の立ち上げ期間中に段階的に行われた。基準軌道の引き継ぎもスムーズに完了し、最小ギャップ 4 mm の真空封止アンジュレータも特別な軌道調整なしで利用することができた。

その他の研究開発

真空関連の R&D としては NEG コーティング関連の開発や BeCu の光脱離測定などの他、ビームライン BL21 を活用して FCC-hh でのビームスクリーンのコーティング材料候補の光刺激脱離 (PSD) 測定などを実施している。運転調整の面では、これまでの自動軌道調整に加えてビームロス低減を目指したオプティクス調整、入射調整などを実施している。

ほかにも高速パルスキッカーのための SiC-MOSFET パルス電源の開発と高繰返し試験など、多くの研究開発を実施している。これらは既存施設への導入はもちろんのこと、次期光源に向けても必須の研究開発要素である。詳細はここでは記載しないが、このほかにも既存施設の高度化と老朽化対策を兼ねて様々な R&D を行っている。セプタム更新計画やビームロスモニター、放射線モニター開発、機械工学センターとの協同でロボットによる遠隔監視システムなどである。

(2) PF - AR の運転・維持・管理および開発

表 2 に PF-AR の直近 3 年間の運転統計数値を、図 5 に過去 15 年間の運転統計をグラフにしたものを示す。2024 年度のユーザー運転の計画時間は 2424 時間を確保し、実際の故障時間は 10.8 時間、故障率も 0.4% と、極めて良好な値を示している。ただし、これらユーザー運転統計には出ていないものの、ビーム輸送ラインでの電磁石電源トラブルや、バンチ純化システムのトラブルなどが起きており、今後も継続して対処することが必要と考えている。故障の内訳は約 62.5% が電磁石関係、26.9% が RF 関係であった。詳細は次章で記述する。

2025 年 1 月 16 日（木）に直流電流トランス (DC Current Transformer, DCCT) の更新作業を実施した。これは AR テストビームライン整備関係予算から措置したものであり、ターゲットワイヤー挿入時のビーム寿命計測をより安定化することを目指している。これまでは周辺磁場の影響などでビーム電流値計測が不安定になる事象も起きて

表 2 直近 3 年間の PF-AR 運転統計

Fiscal Year	2022	2023	2024
Total Operation Time [h]	3000	2760	2976
Scheduled user time [h]	2440	2184	2424
Number of failures	17	16	14
Total down time [h]	21.7	30.3	10.8
Failure rate	0.9	1.4	0.4
MTBF [h]	143.5	136.5	173.1
Mean down time [h]	1.3	1.9	0.8

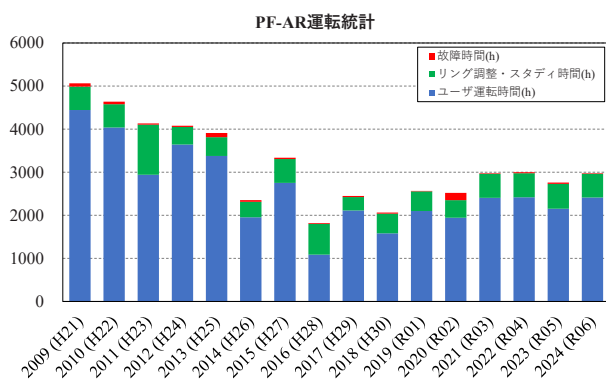


図 5 16 年間の PF-AR 運転状況グラフ

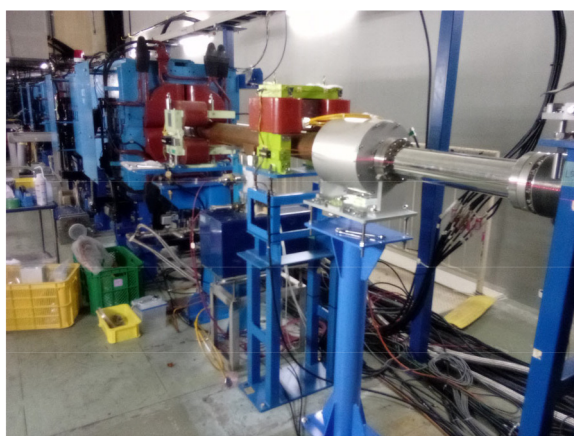


図 6 新 DCCT インストール後の南直線部。写真中央付近にある円筒形の装置が外部磁気シールドを装着した DCCT である。

おり、ビームを停止して消磁作業を行うなど AR の運転に影響を与えていた状況であった。図 6 にインストール後の写真を示す。

PF-AR チタンサブリメーションポンプの真空トラブル

第 2 期運転開始時の 2024 年 10 月にはチタンサブリメーションポンプ（以下 TSP）で真空リークが発生し、ユーザー運転を早期におこなうため真空封止材の塗布で対処して運転を継続した。リークした場所以外も含め、端子カバーを外して全数調査をおこなったところ、コネクタに緑青が出て劣化している場所が 8 か所、信号ケーブルが劣化して

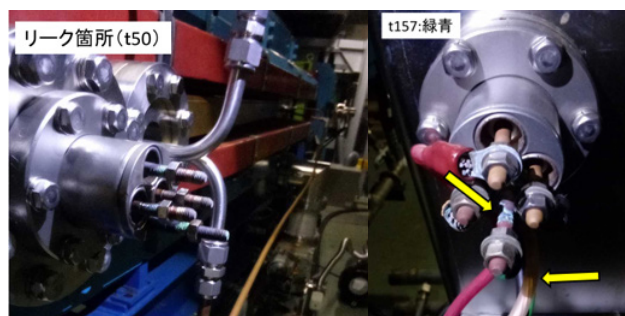


図 7 TSP ポンプのコネクタに発生している緑青およびケーブルの一部が損傷している様子。左は 10 月にリークした場所、右は全数調査で判明した場所の例である。いずれも放射線が原因と考えている。

いる場所が 23 か所あった（図 7）。

既存光源での R&D

PF-AR でも加速器のマシNSTAディを多く実施している。ユーザー運転の安定化および高度化に向けてエミッタンス低減オプティクスを導入調整や、AR の特徴である単バンチ大電流でのビームパラメータの測定、バンチ純度調整などのほか、テストビームラインでの電子収量増加を目的とした 2 バンチ運転の試験などである。これらの研究開発は、既存リングの性能向上はもちろん、次期光源開発につながるものとして推進している。これは、現在稼働している加速器のビーム調整の経験・知見は次期光源開発に重要であり、いわば「車の両輪」として進めるべきという考えに基づいている。

(3) cERL の運転・維持および開発

2024 年度も引き続き応用超伝導加速器イノベーションセンター (iCASA) との協力のもと、cERL 運転ならびに研究開発を遂行している。主な目標は以下の 3 点である：

- 1) 低バンチ電荷 (0.77 pC) のアンジュレータ設置下での大電流 (～1 mA) CW 運転実施
- 2) 機械学習による、ビーム損失低減 & 大電流運転両立
- 3) 高バンチ電荷 (60 pC) を用いた、エネルギー回収運転での FEL 光の発生

機械学習による調整やその他の詳細については、2024 年度に開催された国際学会 (ERL24, <https://conference-indico.kek.jp/event/225>) で発表している。このほか、電子銃直下流の低エネルギー部分において、ソレノイドによりビームプロファイルが大きく変化する現象についてシミュレーションと実測との比較を行っており原因究明と改善策の検討を行っている（図 8）。

iCASA では自由電子レーザーを活用した EUV-FEL 光源の研究開発を進めてきた。これは特に半導体露光装置を念頭においたもので、既存のレーザープラズマ EUV 光源をはるかに凌駕する 10 kW 以上の出力を目指すものである。加速器第六研究系では EUV-FEL 光源の概念設計が

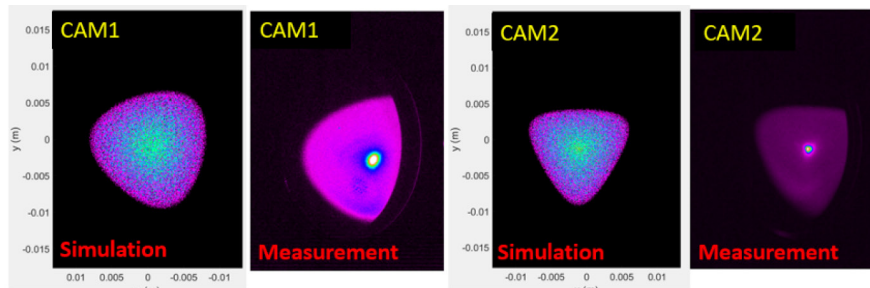


図8 cERL 電子銃下流部での異常なビームプロファイル例

ら、入射部のビームダイナミクス計算などを iCASA と協力して進めている。2024 年度には、内閣府主導のもと創設された「経済安全保障重要技術育成プログラム（通称“K Program”）」で、科学技術振興機構（JST）が公募した「次世代半導体微細加工プロセス技術」の実施先の一部として採択された。実施期間は 2025 年 4 月から 2030 年 3 月までの予定である。加速器第六系は今後も EUV-FEL 光源の開発に積極的に貢献していく。

（４）将来光源計画へ向けた R&D

PF リング、PF-AR とともに稼働から約 40 年経過しており、新しいコンセプトに基づく新たな放射光源を開発し建設することは喫緊の課題である。そこで我々は汎用性と先端性の両方を併せ持つ新たなコンセプトとして、超伝導線形加速器からの高品質ビーム (Single-pass, SP Beam) と、蓄積リングからのビーム (SR Beam) の両方を活用できる施設として「ハイブリッド光源 (PF-HLS)」を提案してきた。これまで投稿論文等で鍵となるコンセプトを紹介するとともに、Conceptual Design Report (CDR) を公開してその後も更新を継続している [2]。

PF-HLS を構成する蓄積リング部分については、世界の放射光源リングの潮流ともいえる極低エミッタンスへアプローチするのではなく、汎用性と多機能性にすぐれた設計としている。特徴の 1 つであるリング設計段階から「2.5 GeV と 5.0 GeV エネルギー可変」というコンセプトを目指した設計に関しては施設の周長やエネルギーの妥当性からエネルギー可変で実現できるサイエンスなども含めて検討している。

並行して、超伝導線形加速器をベースとした量子マルチビーム施設への拡張も議論している。KEK 物構研では放射光はもちろん、陽電子・中性子・ミュオンなど異なる量子ビームを活用したマルチプローブ実験をおこなうことでサイエンスを推進してきたが、現在はサンプルをそれぞれ別の施設で計測する、いわゆる「順次計測」が一般的である。放射光実験の場合でも軟 X 線と硬 X 線での実験をエネルギーの異なる別施設で実施することはよく行われている。次期計画においては、同じサンプルに異なったビームを「同時に」照射することで非平衡状態・ダイナミクスを解明することをはじめとした、新たな分野を開き開くことを目指

している。

超伝導線形加速器・蓄積リングともに開発要素は多く、多岐にわたっている。昨今のエネルギー情勢を反映した省エネ設計も必須であり検討を進めている。蓄積リングのインピーダンスは特に注意が必要な項目の 1 つであり、抵抗性インピーダンスやビーム不安定現象に関する研究を精力的に進めている。また、表面の光刺激脱離の実験や、狭小真空ダクトで必須となる NEG コーティング開発も引き続き進めている。

現在の PF リングではピーク磁場 5 T の垂直偏光超伝導 3 極ウィグラーが稼働している。次期光源ではエミッタンス増大を引き起こさない程度に軌道振幅を抑制しつつ、垂直偏光かつ 2.5 GeV 運転時に 10 keV 以上の高エネルギー帯域の放射光を生成するには 40~50 mm 程度の比較的大きな水平方向ギャップで 2~3 T 以上の高磁場を出す必要がある。そこで Nb₃Sn 線材を使用した円形コイルによる超伝導ウィグラーを設計するとともに、含浸材に関する研究開発やクエンチ保護システムも含め低温工学センターとの協力のもと研究開発を遂行している。

2-3. 今後の展望

加速器第六研究系は加速器専門家集団として、放射光ユーザーに安定してビームを供給することが最も重要なミッションの1つである一方で、老朽化が深刻であるため、限られたリソース（ヒト・モノ・カネ）を有効に活用し、かつ各グループの専門性を活かして対応していく。

同時に、次期光源を早期に実現することが極めて重要である。第六研究系だけではなく加速器第五研究系やiCASAとの協力も積極的に推進し、実現に向けた詳細設計を進めていく。

近年では加速器の性能向上はもちろんのこと、研究開発、ひいては社会活動の持続性も重要な指標となる。GXやSDGsの観点も積極的に取り入れていく。

現在、日本全国で加速器を運営している組織はいずれも老朽化や人手不足など多くの問題に直面している。それぞれの施設で各施設にてのR&Dを行うことはもちろん継続しているが、現場で経験する様々な知見は他施設でも有

用である場合は多い。これまで他施設との情報交換を行うことは、各施設で掲げている次期計画を推進する上でも大きな力となりえる。このような考え方のもとで、PF、UVSOR、HiSORそれに名大SRセンターなども加わる形で、定期的な情報交換会を行うこととした。第1回目は2023年6月7日にオンラインにて開催した。その後もおおよそ月1回のペースで2024年度も継続している。発表内容はそれぞれの施設の現状や問題になっていること、開発中のアイテムに関する相談など多岐にわたり、大変に有意義な情報交換の場となっている。今後も継続していく予定である。

- [1] K. Harada *et al.*, “Conceptual design of the Hybrid Ring with superconducting linac”, J. Synchrotron Rad. (2022). **29**, 118-124, <https://doi.org/10.1107/S1600577521012753>
- [2] <https://www2.kek.jp/imss/pf/pf-hls/>